

ISSN 0389-4010
UDC 621.822.7
621.829.9
62-977
62-982

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1243

真空中，高温下における固体潤滑ころがり軸受の性能

関 勝 美 ・ 鈴木 峰 男 ・ 西 村 允
長谷川 正 二 ・ 森 山 稔

1994年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

真空中、高温下における固体潤滑ころがり軸受の性能*

関 勝美^{*1} 鈴木 峰男^{*1} 西村 允^{*2}
長谷川 正二^{*3} 森 山 稔^{*3}

PERFORMANCE OF SOLID LUBRICATED BALL BEARINGS AT HIGH-TEMPERATURES IN A VACUUM*

Katsumi SEKI^{*1}, Mineo SUZUKI^{*1}, Makoto NISHIMURA^{*2}
Masaji HASEGAWA^{*3} and Minoru MORIYAMA^{*3}

ABSTRACT

Ball bearings which can operate at high temperatures in a vacuum will be required with the advances in technology. Among the issues for the operation of ball bearings at high temperatures, solid lubricants and bearing materials are crucial.

The aim of this study was to develop ball bearings for use at high temperatures in a vacuum. The tested bearings were 20-mm bore-sized angular contact ball bearings. Three combinations of bearing materials were tested: M-50 bearings, hybrid bearings with M-50 races and Si_3N_4 balls, and Si_3N_4 bearings. M-50 bearings were lubricated with a silver film. Hybrid and ceramic bearings were lubricated with a pre-coated sputtered MoS_2 film and a self-lubricating hot-pressed composite retainer. Tests were carried out at temperatures up to 500°C and a rotational speed of 600 rpm under an axial load of 50 N in a vacuum.

Excellent performance at 500°C in a vacuum was obtained for Si_3N_4 bearings. Frictional torque was low and stable for more than 5×10^7 revolutions. The bearings after the test were in very good condition with a small amount of wear. Hybrid bearings also showed very good performance at 350°C in a vacuum. M-50 steel bearings were operated without failure at 350°C in a vacuum, although frictional torque was rather high and unstable.

X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis and scanning electron microscopy (SEM) observation revealed the existence of a film on the ball surface transferred from the composite retainer for both hybrid and ceramic bearings.

Key Words: Ball bearings, Silicon nitride, Molybdenum disulphide, Self-lubricating composite, High temperature, Vacuum

要 旨

技術の進展に伴ない、航空宇宙分野、エネルギー分野、真空産業分野等で、真空中・高温下で動作可能なころ

* 平成6年5月30日受付 (Received 30 May 1994)

*1 宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)

*2 元宇宙研究グループ (現法政大学) (Space Technology Research Group. Presently, Hosei University)

*3 (株)高純度物質研究所 (Pure Materials Laboratory, Co., Ltd.)

がり軸受が要求されるようになってきた。しかし、これを実現するためには解決すべき多くの問題が残されており、特に、適切な軸受材料の選定および耐熱性に優れ高温下で良好な潤滑性能を示す固体潤滑剤を見いだすことが重要である。

本研究は、真空中・高温下で運転できるころがり軸受の実現を目指したものである。試験した軸受は、内径 20mm のアンギュラコンタクト玉軸受 (#7204) で、① M-50 工具鋼製の軸受、② 内外輪が M-50 工具鋼、玉が窒化硅素 (Si_3N_4) 製のハイブリッド軸受、③ 内外輪・玉ともに Si_3N_4 から成る総セラミックス軸受、の 3 種である。M-50 工具鋼製軸受は銀被膜、ハイブリッド軸受および総セラミックス軸受は、内外輪・玉に付着させたスパッタ MoS_2 被膜とホットプレス法で作成した自己潤滑性複合材製保持器からの転移膜によって潤滑される。実験は、真空中、500°C までの温度下において、回転数 600rpm、スラスト荷重 50N の条件で行なった。

Si_3N_4 総セラミックス軸受は、真空中、500°C の条件下できわめて良好な性能を示した。摩擦トルクは、総回転数 5×10^7 回の試験中低く安定しており、また試験後の軸受は摩耗も少なく良好な状態であった。ハイブリッド軸受も 350°C の条件で良好な性能を示した。M-50 工具鋼製軸受は、摩擦トルクはやや高く不安定であったが、350°C で運転可能であった。

X 線光電子分光分析および電子顕微鏡による観察から、ハイブリッド軸受、総セラミックス軸受のいずれの場合も玉表面には保持器からの転移膜が形成されていることが確認された。

1. はじめに

技術の進展に伴ない、航空宇宙分野、エネルギー分野、真空産業分野等で、真空中・高温下で動作可能なころがり軸受が要求されるようになってきた。

真空中・高温下でころがり軸受を運転する際にまず問題になるのは潤滑である。真空中では潤滑剤の蒸発が問題になるため、潤滑油を使用する場合には蒸気圧が低い真空用潤滑油やこれを基油とした真空用グリースを使用する必要がある。現在、広く用いられているのは PFPE 系の潤滑油で、蒸気圧は 100°C で $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Pa 程度¹⁾ である。しかし、温度の上昇と共に蒸気圧が指数関数的に増大すること、蒸発した油が周囲を汚染するなどの問題点があり、潤滑油をさらに高温下で使用することはむずかしい。従って、真空中・高温下で使用する場合は固体潤滑剤に頼らざるを得ないが、代表的な固体潤滑剤の一つである高分子系の複合材はあまり高温では使用できず、例えば PTFE 系の複合材の使用温度は 100°C 程度以下である²⁾。銀や二硫化モリブデン (MoS_2) などは、高分子系複合材に比べると高温下でも使用可能で^{3), 4)}、現在までのところ 300°C 程度まで使用可能であることが報告されているが、温度が高くなるほど寿命が低下する傾向がある^{5), 6)}。このため、さらに高温下でも使用できる固体潤滑剤を開発するための研究が、主にジェットエンジン用の軸受に関連して数多く行なわれてきた。NASA の Sliney らは、 $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ 共晶をプラズマスプレー法で作成した被膜や HIP 法で焼固めた複合材を開発し、850°C くらいの高温下でも潤滑特性が良好であることを示した^{7), 8)}。 $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ 共晶は高温下での潤滑特性を評価する際の指標とされることが多いが、常温でのトライボロジー特性があまり良好でないという欠点があり、例えば Ag を添加するなど⁹⁾、常温での潤滑性を確保するための

方策が必要である。Boes は、 WSe_2 に In/Ga 共晶合金を配合した複合材を高温用潤滑剤として開発した¹⁰⁾。この複合材は耐酸化性に優れるため、ジェットエンジン用軸受の保持器材として試験されたが、軸受寿命は 315°C で 215 時間だったのが 538°C では 10 時間に低下したことが報告されており¹¹⁻¹³⁾、実用化されていない。米国空軍・材料研究所の McConell, Mecklenberg¹⁴⁾ は、Campbell, Van Wyk¹⁵⁾ が開発したホットプレス法による MoS_2 を主成分とする金属系複合材を保持器に用いた玉軸受を真空中で試験し、極めて長寿命を示すことを明らかにした。この複合材は真空中や不活性ガス雰囲気では数百 °C 程度までの高温で良好なトライボロジー性能を示すが、高温大気中では MoS_2 の酸化劣化のため耐摩耗性が大幅に低下することがわかっている^{16), 17)}。ただし、類似の複合材はジェットエンジンのスラストリバーサの軸受として用いられており¹⁸⁾、この種の複合材は高温用として有望と思われる。鈴木・森山・西村は、 MoS_2 に耐火金属及び耐火金属の酸化物を添加した複合材を開発し、高温・真空中で良好なトライボロジー特性を、特に相手材が窒化硅素 (Si_3N_4) の場合に示すことを明らかにした¹⁹⁾。しかし、この複合材も大気中ではトライボロジー特性が劣化する。

以上述べたように、現存する固体潤滑剤はいずれも高温下で使用可能であっても使用環境が真空中や不活性ガス雰囲気中に限られたり、常温下でのトライボロジー特性に難点があるなど欠点をもっており、すべての条件に適合できる固体潤滑剤は今のところまだ見いだされていないのが現状である。

ころがり軸受を固体で潤滑するには、あらかじめ内外輪・玉に固体潤滑膜を付着させて潤滑する方法、及び自己潤滑性のある材料で保持器を作成し、保持器からの転移膜による潤滑を併用する方法が一般的である。固体潤滑被膜の

最大の欠点は、膜が摩耗していくため寿命が限られることである。このため最近、固体潤滑剤粉末を軸受内に直接吹き込むという方法²⁰⁾、エチレン²¹⁾や TCP²²⁾などのガスを吹き込み、表面に固体潤滑膜を“その場”で形成させる方法など、種々提案されているが、いずれの方法でも良好な潤滑膜はあまり形成されていないようである。従って、現在のところ、内外輪・玉に付着させた被膜に主に運転初期の潤滑を担当させ、その被膜が摩耗した後は保持器からの転移膜による潤滑で長期間にわたり安定して良好な潤滑を確保するという方策が最も現実的であり、また有効と思われる。

高温下でころがり軸受を使用する際には、軸受材料も問題になる。従来、ころがり軸受材料には軸受鋼がもっぱら用いられているが、180°C以上の高温になると硬度が低下してしまうため使用できなくなる。高温用として実績のある M-50 工具鋼を用いた場合、使用温度限界は 350°C 程度であり、これ以上の温度では、耐熱合金やセラミックスで製作した軸受を使用しなければならない。耐熱合金製の軸受では、ステライトが実験室的には好成績を示した²³⁾が、硬度を高くできないという問題がある。一方、セラミックスについては窒化珪素 (Si_3N_4) がころがり軸受として実績があり、高温用途に有望である。ただし、熱膨張係数が金属とはかなり異なるため、金属製の軸とのはめ合いの点で使用用途が限られる恐れもある。また、M-50 工具鋼に対しては良好な性能を示す固体潤滑剤が Si_3N_4 に対しては摩擦摩耗特性が劣化する例が報告されており^{24), 25)}、軸受材と固体潤滑剤との適合性など不明な点も多い。

この他にも高温で使用する際の実際上の問題点として、軸受外輪の潤滑があげられる。通常、軸受は内輪を回転軸に固定して使用されるが、軸とハウジング間に熱膨張差がある場合には、外輪はハウジングに対して軸方向にスムーズに移動できなければならない。この移動量は、使用用途によっては数 mm にも達するため、もし外輪がハウジングに固着すると過大なスラスト荷重が軸受に負荷されたり、ミスアライメントが大きくなるなど、軸受の損傷につながる恐れがある。高温下で使用されるころがり軸受の外輪は、微少なすべり摩擦に十分耐えられるよう固体潤滑しなければならない点にも留意する必要がある。

以上述べたように、高温下で使用する軸受を実現するためには未だに多くの問題が残されている。本研究は、真空中・高温下で運転できるころがり軸受の実現を目指したものである。

まず、鋼の使用限界と思われる 350°C で、M-50 工具鋼製の軸受を銀で潤滑した試験結果について述べる。銀は真空中・高温中ではしばしば潤滑剤として用いられている。次に、M-50 工具鋼製の内外輪と Si_3N_4 製の玉の組合せであ

るハイブリッド軸受を、 MoS_2 スパッタ膜と自己潤滑性複合材製の保持器からの転移膜で潤滑した場合について述べる。自己潤滑性複合材はホットプレス法で作成したもので、摩擦試験によって組成の最適化を行なった結果、真空中、450°C において、特に相手材が Si_3N_4 の場合に良好なトライボロジー特性が得られたものである¹⁹⁾。複合材の組成は、 $\text{MoS}_2 + \text{MoO}_3 + \text{Nb}$ 及びこれに SUS304 を添加して強度を向上させたもの、2 種である。さらに、高温で良好な性能が期待される内外輪・玉ともに Si_3N_4 製の総セラミックス軸受について、試験温度を 500°C に上げ、 MoS_2 スパッタ膜のみで潤滑した場合、及び複合材保持器からの転移膜潤滑を併用した試験結果について述べる。

2. 実験装置、試験軸受および実験条件

図 1 に、試験に用いた超高真空中ころがり軸受試験装置を示す。軸受試験装置はクライオポンプを装備した主真空室と、2 台の高温用軸受試験モジュール及び 2 台の常温用軸受試験モジュールから構成されている。各試験モジュールは各々独立の主軸駆動系と測定系をもっており、同時に 4 種の試験を行なうことができる。本研究では、2 台の高温用軸受試験モジュールを用いて実験を行なった。

図 2 に、高温用軸受試験モジュールの構造の概略を示す。1 対の試験軸受は、磁性流体シールユニットに内蔵された軸受によって支持される SUS304 製の主軸に取り付けられ、試験軸受の間に設置したコイルバネによってスラスト荷重が負荷される。主軸はタイミングベルトを介して真空槽外部のモーターによって駆動した。

試験軸受部は SUS304 製の反射板で囲まれており、その内側に取り付けた石英ガラス管に入ったモリブデン製のヒータにより加熱できるようになっている。磁性流体シールを冷却するため、シール外周部には水冷ジャケットを設け、主軸端に取り付けたロータリージョイントを通して主軸内に水を流した。

運転中は軸受の摩擦トルク、軸受外輪温度および軸受からのアウトガスを測定した。摩擦トルクはトルクアームにより摩擦力を大気側に伝えて測定した。トルクアームはベローズで真空シールを行なっており、玉軸受で支持されているため、その支点回りに自由に動ける構造となっている。試験軸受のハウジングにはロッドが取り付けられており、このロッドが試験軸受の摩擦トルクによりトルクアームの真空槽側の一端を押し、その結果、トルクアームは大気側でストレンゲージを貼った板バネに押しつけられる。測定された摩擦トルクは試験軸受 2 個分の値である。軸受外輪温度は、シース型の熱電対を軸受外輪に当てて測定した。また、アウトガス測定には、分析範囲が $m/e=1\sim 100$ の 4 重極質量分析計を用いた。

表 1 に実験に用いた軸受を示す。試験軸受は内径 20 mm

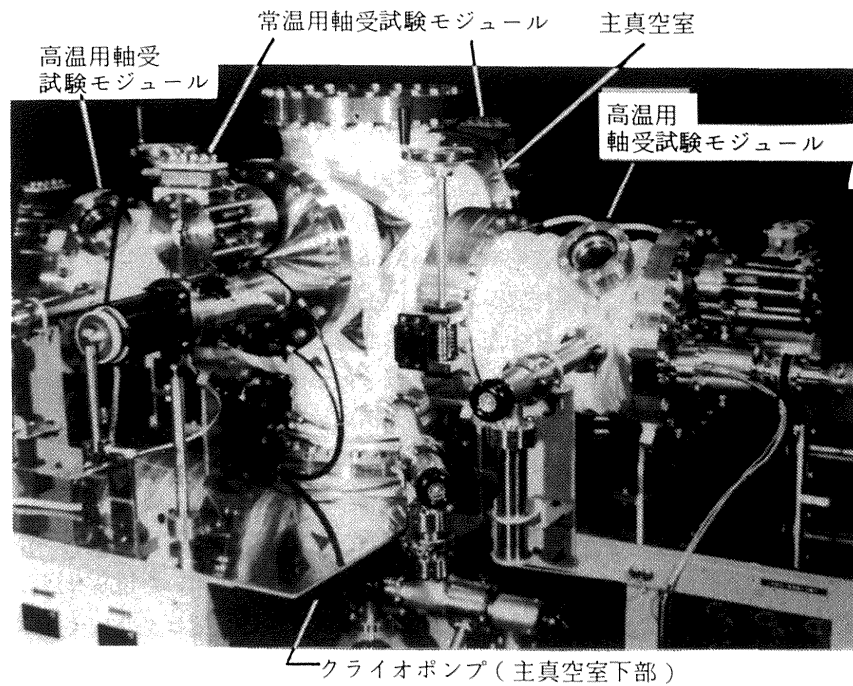


図1 軸受試験機

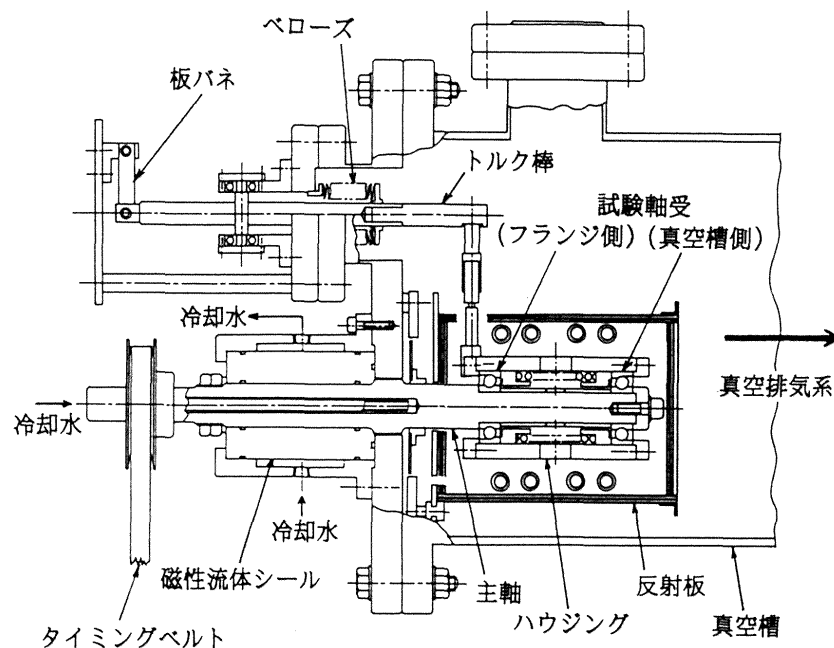


図2 高温用軸受試験モジュール

のアンギュラ玉軸受（#7204，接触角 30° ）で，内外輪・玉ともに M-50 工具鋼製の軸受，内外輪 M-50，玉 Si_3N_4 のハイブリッド軸受，および内外輪・玉ともに Si_3N_4 の総セラミック軸受の 3 種について試験した。

M-50 製軸受の内外輪・玉にはイオンプレーティング法で銀膜を付着させ，銀の厚膜めっきを施した保持器を用いた場合，および保持器なしの総玉形式軸受とした場合の 2 例について試験した。ハイブリッド軸受，および Si_3N_4 の総セラミック軸受は内外輪・玉に MoS_2 をスパッタリング法で付着させ，保持器にはホットプレス法で作成した金属

系複合材 2 種を用いた。複合材の組成およびホットプレス条件を表 2 に示す。 Si_3N_4 軸受については，保持器なしの総玉形式とした場合についても試験を行なった。

実験は回転数 600rpm，スラスト荷重 50N 一定で行なった。試験温度は M-50 製軸受，ハイブリッド軸受の場合は 350°C ， Si_3N_4 軸受の場合は 500°C とした。試験は，総回転数で 5×10^7 回（運転時間約 1400 時間）となった時点で打ち切った。

試験後の軸受は，回転精度（ラジアル振れ，アキシャル振れ），内外輪軌道と玉の真円度，内外輪軌道溝および保

表 1 試験軸受

試験軸受 および軸受材	内外輪・玉の 表面処理	保 持 器 材 質	保持器すきま 案内 ^{*2} ポケット	玉径・個数	最大面圧 ^{*3} (内輪側)	試験温度
鋼製軸受 内外輪：M-50 玉：M-50	イオンレーティング銀膜 (膜厚 1μm)	M-50 + 銀厚膜メッキ	0.13mm, 0.26mm	7.9375mm, 8個	0.48 GPa	350℃
		なし(総玉形式)	-----	7.9375mm, 10個	0.45 GPa	
ハイブリッド軸受 内外輪：M-50 玉：Si ₃ N ₄	スパッタ MoS ₂ 膜 (膜厚 1μm)	ホットプレス複合材S-5 ^{*1}	0.45mm, 0.26mm	7.9375mm, 8個	0.59 GPa	350℃
		ホットプレス複合材S-0 ^{*1}				
セラミック軸受 内外輪：Si ₃ N ₄ 玉：Si ₃ N ₄	スパッタ MoS ₂ 膜 (膜厚 1μm)	なし(総玉形式)	-----	6.35mm, 16個	0.80 GPa	500℃
		ホットプレス複合材S-5 ^{*1}	0.40mm, 0.35mm	6.35mm, 10個	0.94 GPa	
		ホットプレス複合材S-0 ^{*1}				

*1 ホットプレス複合材S-0, S-5の組成、作成条件は表2参照のこと

*2 保持器はすべて内輪案内

*3 最大面圧は、常温で被膜がない場合の計算値

表 2 保持器複合材の組成およびホットプレス条件

番号	組 成	ホットプレス条件
S-0	80%MoS ₂ + 10%MoO ₂ + 10%Nb	圧力：40 MPa 温度：1090°C 保持時間：1 min
S-5	75%MoS ₂ + 10%MoO ₂ + 10%Nb + 5%SUS304	

持器の摩耗を測定するとともに、玉についてはX線光電子分光分析 (XPS) を行なった。XPS 分析では、AlK α のX線源を用い、10kV, 30mA の条件で励起させたX線を厚さ2 μ m のアルミ箔フィルターを通した後、試料に照射した。試料の深さ方向に分析するため、熱陰極型のイオン銃を用いて2kV, 20mA, 5 $\times 10^{-2}$ Pa の条件でアルゴンイオンエッチングを行なった。この条件でのエッチング速度は金膜の場合が約4.8nm/min, MoS₂ 膜の場合で約3nm/minであった。

3. 実験結果

3.1 銀潤滑 M-50 製軸受

図3に、銀で潤滑されたM-50製軸受の350°Cにおける摩擦トルクと運転時間の関係を示す。図3(a)はAg厚膜メッキ保持器付き軸受の場合、図3(b)は保持器なしの総玉軸受の結果である。いずれの場合も摩擦トルクは比較的高く、また変動も大きい。軸受が焼付くことなく1400時間以上の運転が可能であった。真空槽内の圧力は、運転中10⁻⁶Pa台を示し、急激な圧力変動もみられなかった。この条件下では、銀潤滑 M-50 製軸受のアウトガスはほとんど問題にならないと思われる。

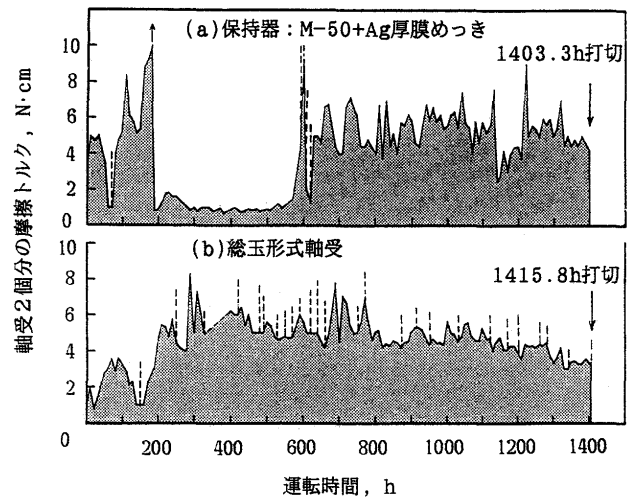
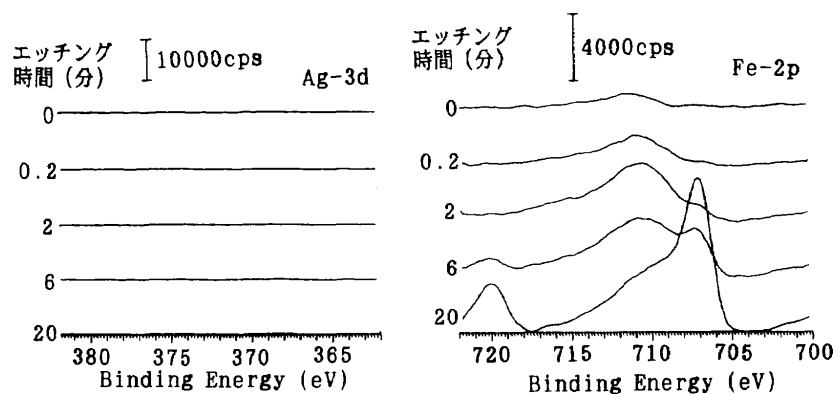
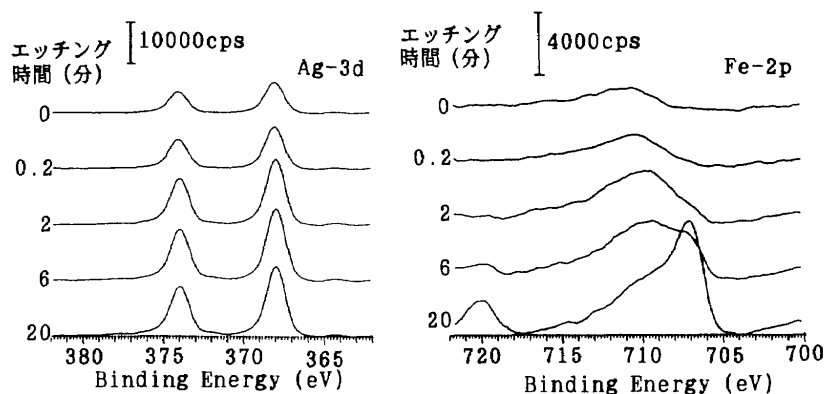


図3 銀潤滑 M-50 軸受の摩擦トルク

試験後の軸受の様相は、Ag厚膜メッキ保持器付き軸受の場合は2個の試験軸受のいずれの玉も銀色を呈しており、肉眼でも明らかに銀膜が残っているのが確認された。しかし、総玉軸受では真空槽側軸受の玉には銀膜が残っているのが認められたものの、フランジ側軸受ではほとんどの玉が鋼の光沢を示していた。図4, 5は玉のXPS分析結果で、

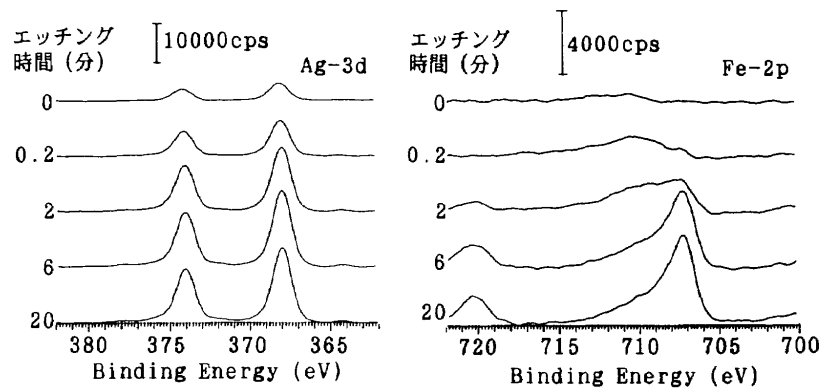


(a) フランジ側軸受

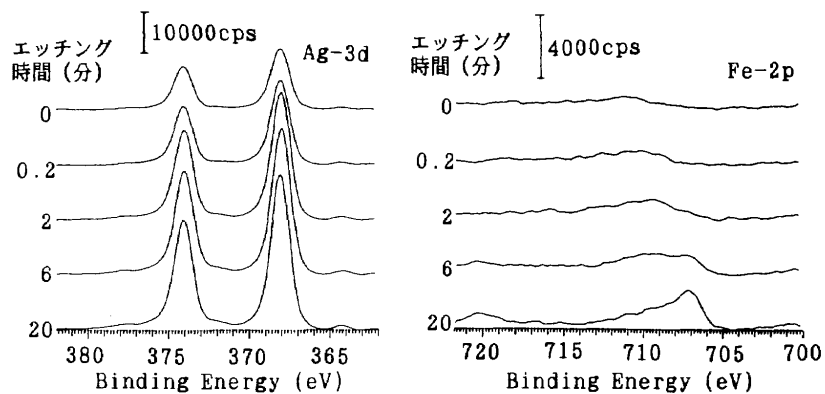


(b) 真空槽側軸受

図4 試験後の玉の XPS スペクトル (総玉軸受)



(a) フランジ側軸受



(b) 真空槽側軸受

図5 試験後の玉の XPS スペクトル (保持器付き軸受)

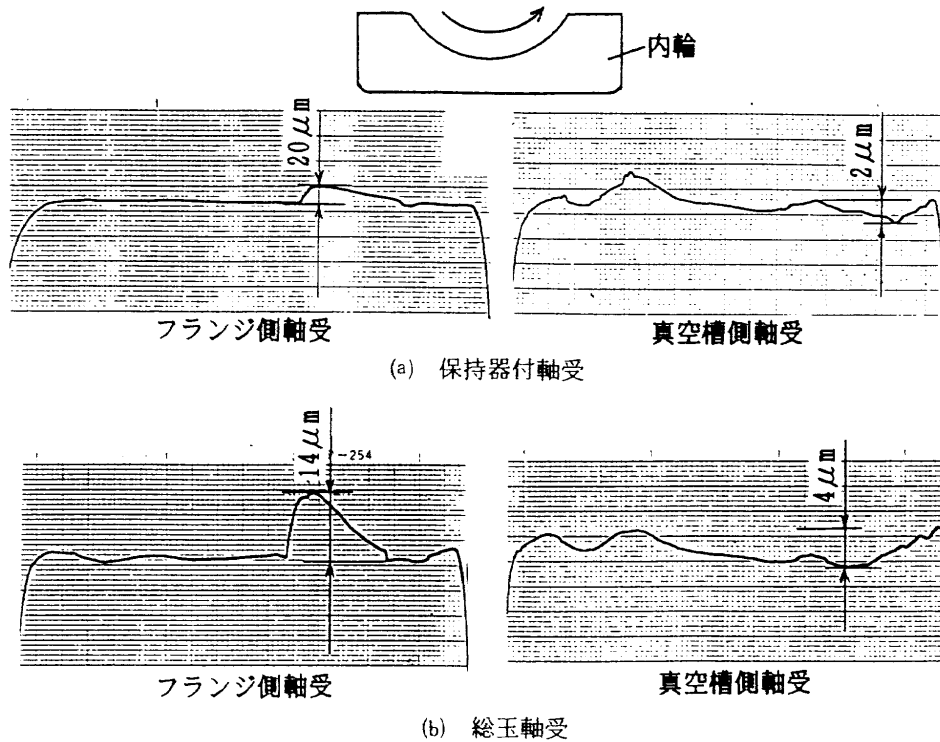


図6 銀潤滑 M-50軸受の内輪R形状

Ag と Fe のスペクトルを示したものである。図4の総玉形式軸受では、表面が鋼の光沢を示していたフランジ側軸受の玉からは銀がほとんど検出されず、銀膜はほぼ摩耗しきっていたことが確認された。一方、真空槽側軸受からは銀が多量に検出された。図5の保持器付き軸受の場合には、いずれの軸受からも銀が多量に検出された。検出された銀が元々玉に付着していたイオンブレーティング膜によるものか、保持器の Ag 厚膜メッキから転移したものなのかは識別できないが、総玉軸受の場合と比べると銀のピークが大きく鉄のピークが小さいことから、保持器から銀が転移したために、より厚い銀膜が残存していたものと推測される。

図6は内輪軌道面のR形状である。R形状は、図の上部に示したように内輪軌道面の曲率に沿って表面あらさ計の触針を走査させて測定したものであり、摩耗や盛り上がりがないければ直線になる。保持器付き、総玉いずれの形式の軸受でも、フランジ側軸受の内輪に盛り上がりが見られた。摩耗した銀が軌道面に付着したためと推測される。一方、真空槽側軸受ではわずかながら摩耗が認められた。図7に Ag 厚膜メッキ保持器のポケット部の摩耗状況を示す。摩耗した部分の周辺が盛り上がり、摩擦により銀膜が塑性流動を起こし摩擦部周辺に押しのけられた状態になっている。摩耗深さは真空槽側軸受の場合5~30μm程度、フランジ側軸受では30~80μmである。Ag 厚膜めっきの初期膜厚は約0.3mmで、まだ銀膜は残っており下地は現れていない。

試験後の軸受の検査結果をまとめて表3に示す。保持器

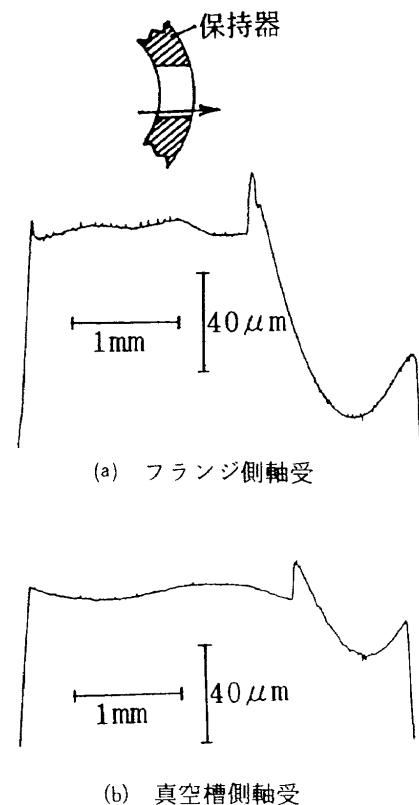


図7 Ag厚膜めっき保持器ポケット部の摩耗状況

付き軸受の真空槽側は、真円度、回転精度ともに劣化は認められず、軸受は良好な状態にあったと推定される。この軸受では、図5に示したように玉表面から特に厚い銀膜が検出されており、銀膜で良好に潤滑されていたことがうか

がえる。保持器付き、総玉いづれの形式の軸受でも、フランジ側軸受の内輪真円度が大きく、また回転精度も劣化していた。これらの軸受では内輪軌道面に盛り上がりが見られ、軌道面に過剰に付着した銀の摩耗粉により真円度、回転精度の劣化につながったものと思われる。試験中、摩擦トルクの変動が大きかったのもこのような軌道面に付着した摩耗粉の影響と推測される。

以上の結果から、350°C 程度までの高温真空中で銀潤滑した M-50 軸受が使用可能かどうか検討してみよう。総玉軸受形式の場合、真空槽側軸受の玉にはまだ銀膜は残っており、回転精度の劣化と内輪の摩耗が認められるものの、まだ運転は可能と思われる。しかし、フランジ側軸受の玉にはほとんど銀膜が残っておらず、かなり寿命に近い状態になっていた。玉同士の干渉の程度の違いが銀膜の摩耗の差になって現れたものと推測される。総玉軸受形式では、安定した性能を得るためには何らかの方法により玉同士の

干渉をコントロールする必要があると思われる。

これに対して、Ag 厚膜メッキ保持器付き軸受では 2 個の試験軸受いづれの場合も玉、保持器ともに銀膜が十分残っていた。玉同士の干渉がないこと、玉と保持器が干渉すると逆に保持器から銀が供給されることが総玉形式軸受との相違になって現れたものと推測される。運転中にトルク変動がみられたり、回転精度が劣化した場合があるのは、潤滑膜が無くなったためではなく、摩耗した銀が系外に排出されずに軌道面に過剰に付着したためと考えられる。これらのことを考慮すると、この軸受はさらに長時間の運転が可能と思われる。トルクがあまり問題にならない用途であれば、Ag 厚膜メッキ保持器付き軸受は 350°C 程度までの高温真空中で使用可能である。

3.2 自己潤滑性複合材保持器を用いたハイブリッド軸受

図 8 は、玉が Si_3N_4 、内外輪が M-50 工具鋼のハイブリッド軸受を 350°C で試験した場合の摩擦トルクと真空槽圧力の推移を示したものである。内外輪・玉にはともにスパッタリング法によって MoS_2 膜を付着させており、保持器はホットプレス法で作成した複合材である。図 8(a) は保持器複合材の組成が 75% MoS_2 + 10% MoO_2 + 10% Nb + 5% SUS304 の場合、図 8(b) は 80% MoS_2 + 10% MoO_2 + 10% Nb の場合である。

いづれの場合も運転終了の 1406 時間まで摩擦トルクは低く、非常に安定した性能を示した。また、真空槽内の圧力は運転中 10^{-6} Pa 台を保持し、複合材保持器に起因するアウトガスもみられなかった。

図 9 に試験後の内輪表面の R 形状を、図 10 に保持器のポケット部の摩耗形状を、また表 4 には試験後の軸受の検査結果をまとめたものを示す。図 9 に示したように、いづれの保持器を用いた場合でも、内輪軌道面には $4 \sim 5 \mu\text{m}$ の摩耗が生じていた。しかし、これ以外は特に異常は認められず、軸受の状態は良好であった。保持器の摩耗は、図 10 に示したように、SUS304 を含む保持器は SUS304 を含まない

表 3 銀潤滑 M-50 軸受の試験後の検査結果

試験軸受 内外輪・玉 保持器 取付位置	M-50 + イオンプレーティング銀膜			
	M-50 + 銀厚膜めっき		なし (総玉軸受形式)	
	フランジ側	真空槽側	フランジ側	真空槽側
回転精度				
ラジアル振れ μm	>20	3	12	4
アキシアル振れ μm	>20	3	7	15
真円度				
内輪 μm	12.5	0.12	4.28	0.21
外輪 μm	1.07	0.96	0.70	0.86
玉 μm	1.00	0.34	0.44	0.86
軌道溝摩耗*				
内輪 μm	-20	2	-14	4
外輪 μm	0	0	0	0
保持器摩耗				
ポケット μm	30-80	5-30	----	----
案内面 μm	0	0	----	----

運転条件: 50N, 350°C, 総回転数 5×10^7 回

* マイナスの数値は盛り上がっていたことを示す

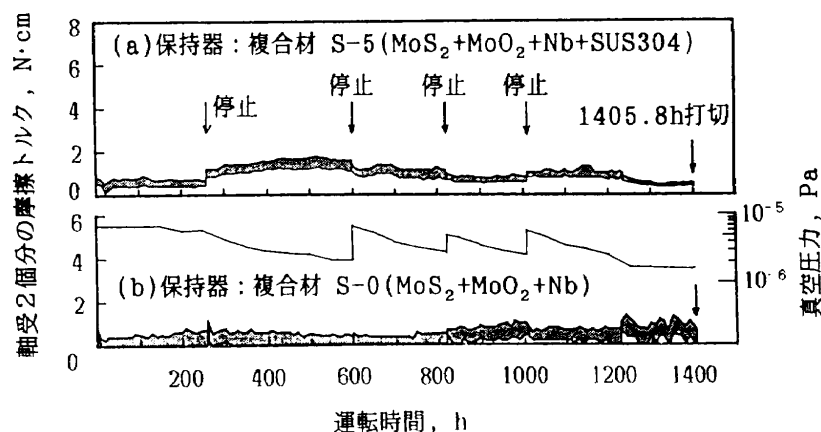


図 8 ハイブリッド軸受の摩擦トルク

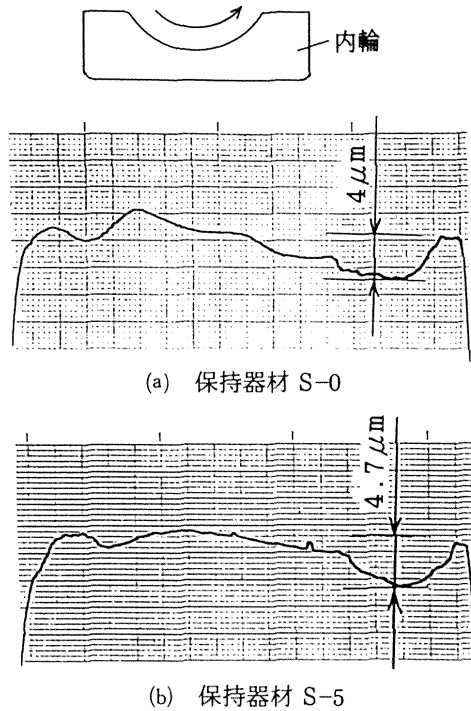


図9 試験後の内輪R形状

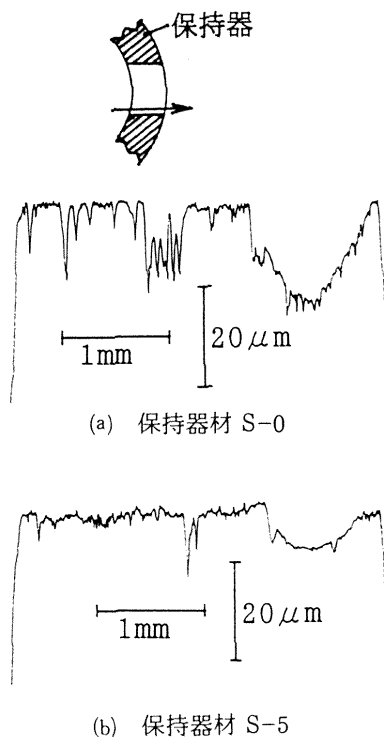


図10 複合材保持器のポケット部の摩耗状況

保持器より摩耗が少なかった。また、表4の注で記述したように、軸受を分解する際にSUS304を添加していない複合材保持器は2個とも壊れたが、SUS304を添加して強度を向上させた複合材保持器では問題なく分解できた。保持器として使用する場合は、SUS304を添加した複合材の方が強度、耐摩耗性のいずれの点でも適している。

表4 ハイブリッド軸受の試験後の検査結果

試験軸受 内外輪・玉 保持器 取付位置	M-50 + スパッタリングMoS ₂ 膜			
	複合材保持器 S-5 ^{*1}		複合材保持器 S-0 ^{*1}	
	フランジ側	真空槽側	フランジ側	真空槽側
回転精度				
ラジアル振れ μm	11	2	6	5
アキシャル振れ μm	3	3	2	2
真円度				
内輪 μm	0.21	0.83	0.44	0.46
外輪 μm	1.42	1.71	0.93	0.66
玉 μm	0.11	0.23	0.20	0.15
軌道溝摩耗				
内輪 μm	4.7	2.2	3.8	4
外輪 μm	0	0	0	0
保持器摩耗				
ポケット μm	---- ^{*2}	16-21	5-10	5-8
案内面 μm	---- ^{*2}	3	0	0

運転条件：50N、350°C、総回転数 5×10^7 回

*1：S-0の組成 80%MoS₂+10%MoO₃+10%Nb

S-5の組成 75%MoS₂+10%MoO₃+10%Nb+5%SUS304

*2：試験後軸受分解時に保持器が破損したため測定不可

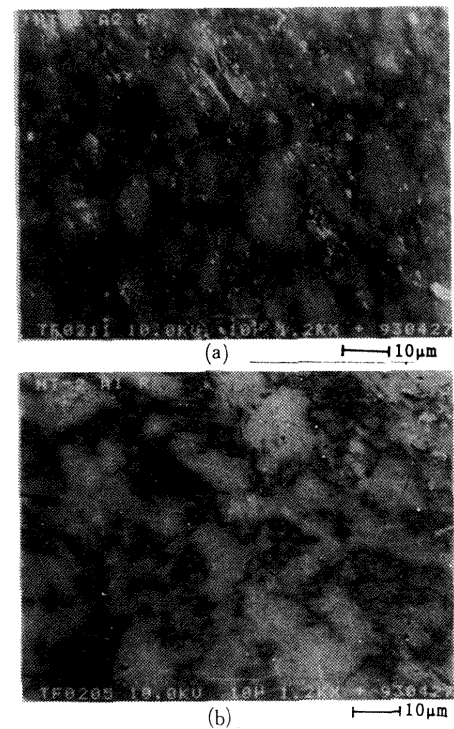
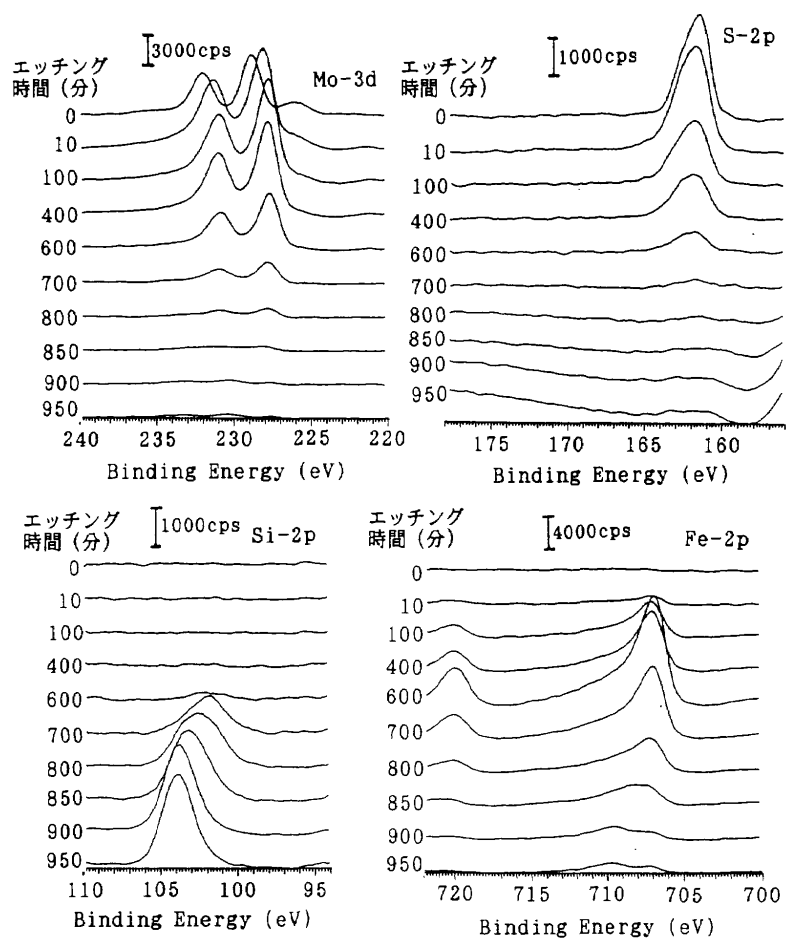


図11 試験後の玉表面のSEM写真

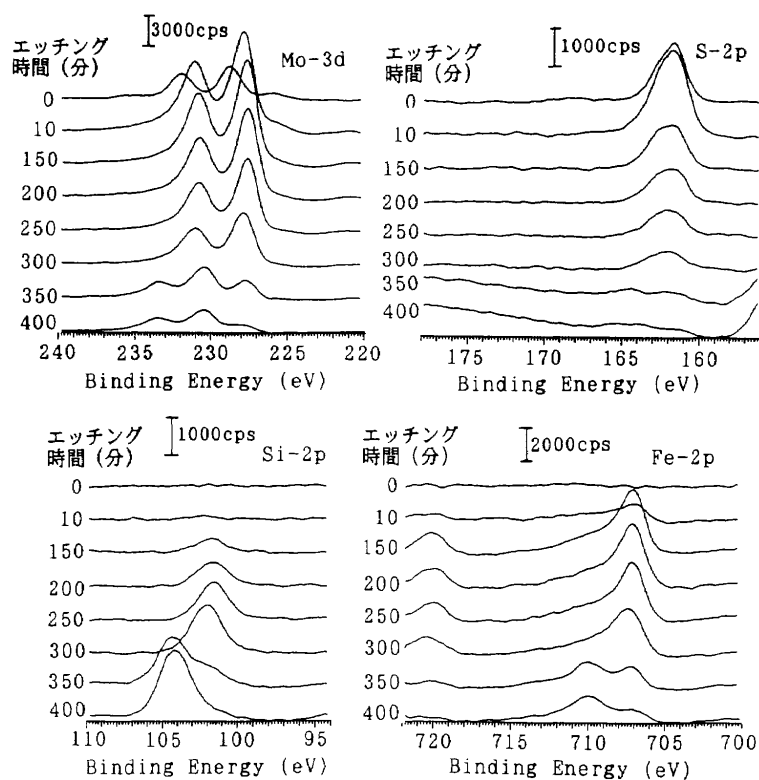
(a) 保持器材 S-0, (b) 保持器材 S-5

図11は、試験後の玉表面のSEM写真である。玉表面には島状の膜が散在しており、残存しているMoS₂スパッタ膜というより、保持器から転移したMoS₂膜であるようにみえる。

図12は玉表面をXPSで深さ方向に分析した結果で、比較のために未使用の玉の分析結果も併せて示した。図には、

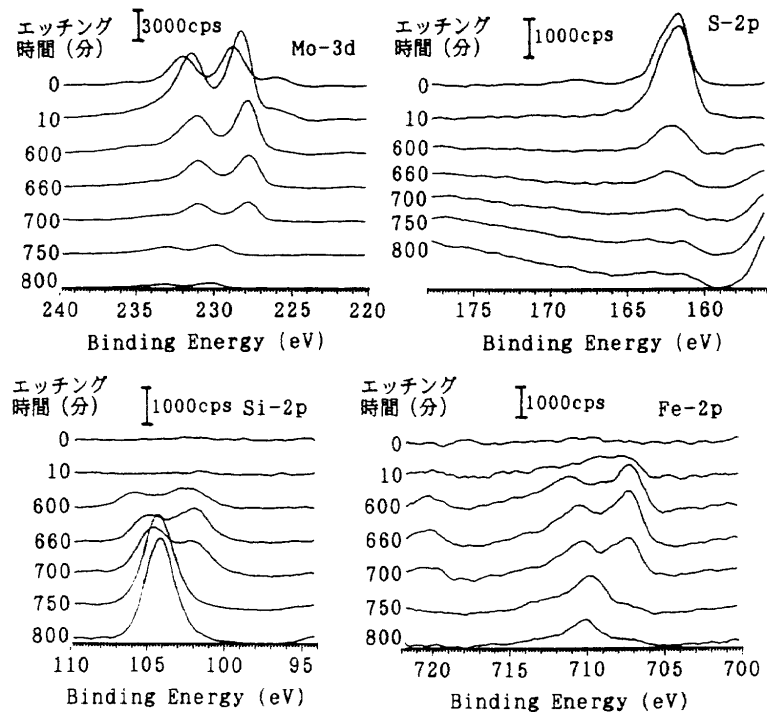


(a) 保持器材 S-0

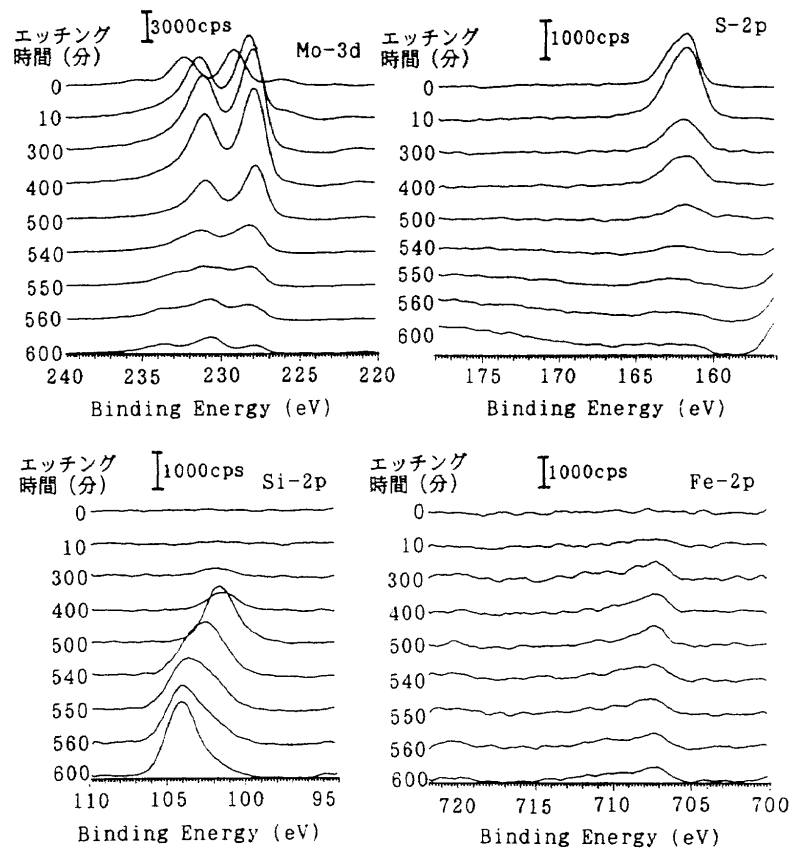


(b) 保持器材 S-5

図12 試験後の玉の XPS スペクトル



(c) 保持器材 S-5, (b)とは別の玉



(d) 未使用玉

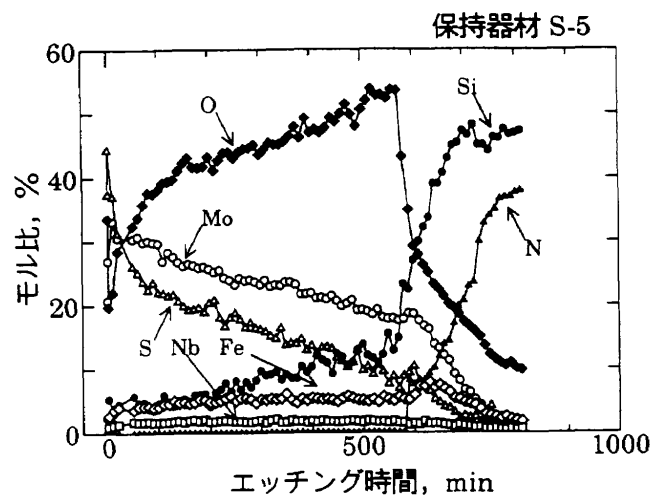
図12 (続き)

Mo-3d, S-2p, Si-2p, Fe-2p のスペクトルを示してある。いずれのスペクトルにおいても、あるエッチング時間から結合エネルギーが高い方にピークがシフトしている。これはエッチングにより固体潤滑膜が取り去られ下地の Si_3N_4 が現われ、導電性が失われ帯電したためである。すなわち、この深さが固体潤滑膜と下地 Si_3N_4 の界面ということになる。試験した玉からは、表層部からピークシフトが起こるまで Mo と S のピークが検出されており、玉表面の膜が MoS_2 であったことがわかる。また、ピークシフトが起こるエッチング時間を未使用の玉と比較すると、試験後に残っていた MoS_2 膜が試験前と同程度かまたはむしろ厚かったことが確認できる。

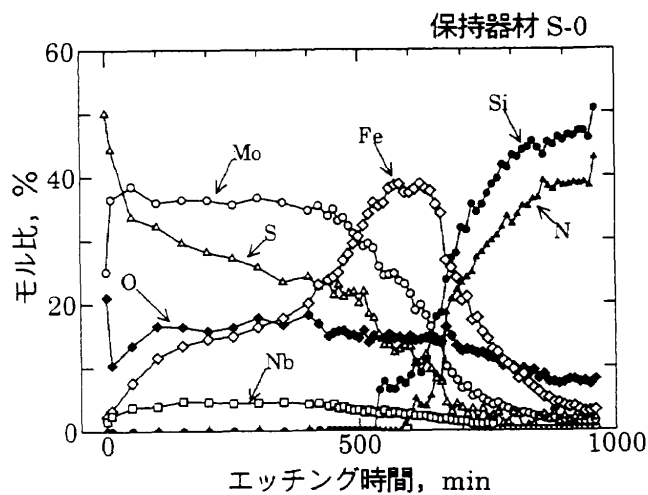
Fe のスペクトルをみると、いずれの保持器を用いた場合でも試験後の玉からは帯電が生じる付近まで Fe が検出されており、 MoS_2 膜内に Fe が存在していたことがわかる。未使用の玉からは Fe はほとんど検出されていないため、この Fe はスパッタリング中に MoS_2 膜内に入ったも

のではなく、試験中に MoS_2 膜に取り込まれたものである。

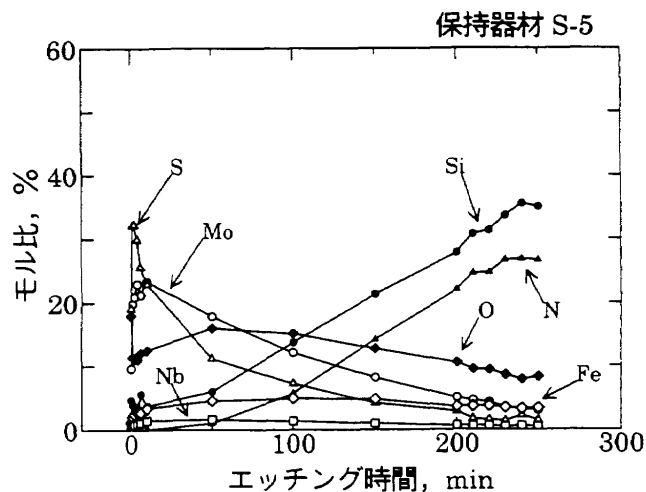
図13は、図12のスペクトルから各元素のピーク強度がエッチング時間に対してどのように変化したかを示したもの



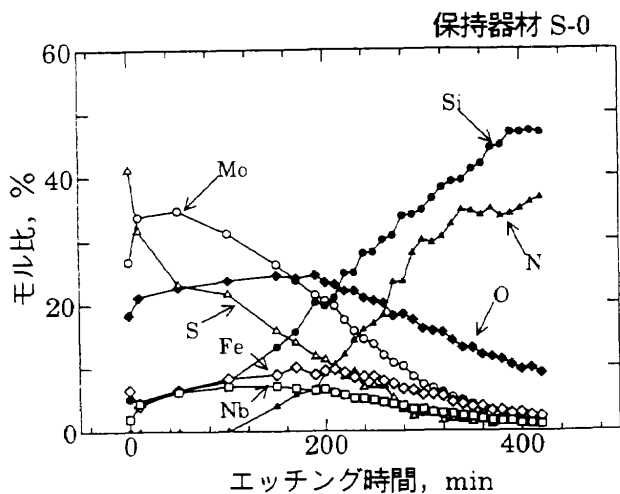
(c) 保持器材 S-5



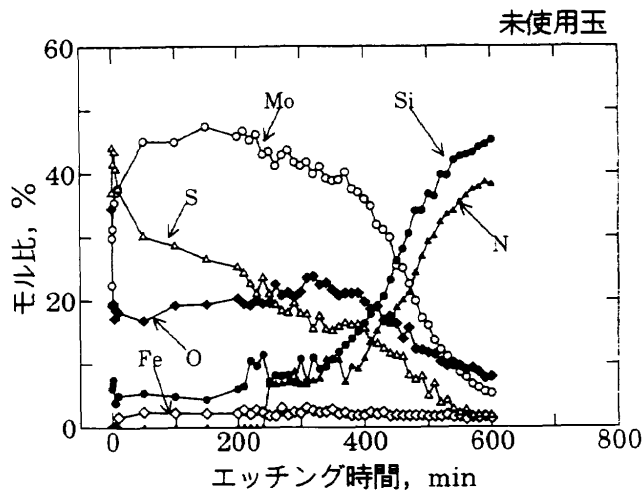
(a) 保持器材 S-0



(d) 保持器材 S-5, (c)とは別の玉



(b) 保持器材 S-0, (a)とは別の玉



(e) 未使用玉

図13 試験後の玉の XPS 深さ方向分析結果

で、(a), (b)は SUS304 を添加していない保持器を用いた軸受の場合、(c), (d)は SUS304 を添加した保持器を用いた軸受の場合、(e)は未使用の玉を分析した場合である。いずれの図でも、エッチング初期は Mo と S のピーク強度が高いが、エッチングがある時間以上になると Mo, S のピーク強度が低下し Si, N のピーク強度が大きくなっており、エッチングによって表面の被膜が取り去られ下地の Si_3N_4 が現われてくる様子が明瞭に見て取れる。なお、図で縦軸はモル比率を現わしているが、被膜部分での Mo : S 比が 1 : 2 でなく、また下地部分での Si : N 比が 3 : 4 になっていない。これは、元素によってエッチングレートが異なる選択エッチングの影響²⁶⁾、校正していない感度係数を用いていること、およびピーク強度を算出する際の波形分離での誤差などがあるためである。従って、図13の結果は半定量分析というべきものである。

図13(a)では、被膜と下地 Si_3N_4 との界面はエッチング時間約600分のあたりと推定されるが、非常に興味深いのは、この界面の部分で Fe のピーク強度がきわめて大きくなっていることである。この軸受は SUS304 を添加していない保持器を用いているため、検出された Fe は軸受材の M-50 に起因するということになる。また表 4、図 9 に示したように、内輪には摩耗が生じていたが外輪では摩耗が認められないことから、この Fe はもっぱら内輪が摩耗して付着したものと考えられる。Fe が界面で多く検出されたことは、あらかじめ付着させたスパッタ MoS_2 膜が摩耗してしまい、露出した Si_3N_4 表面に内輪から摩耗した M-50 が付着し、さらにその上に保持器からの転移膜が形成されたことを示している。一方、図13(b), (c), (d) では Fe のピーク強度ははるかに小さく、図13(a)とはかなり異なる分析結果が得られた。しかし、図11(e)の未使用ボールと比較すれば Fe のピーク強度は大きく、しかも界面付近で Fe のピーク強度が高くなる傾向が認められる。Fe の付着量は図13(a)のボールに比べてはるかに少ないものの、これらのボールにおいてもあらかじめ付着させたスパッタ MoS_2 膜が摩耗し、露出した Si_3N_4 表面に内輪から摩耗した M-50 が付着していたと推定できる。また、転移膜が比較的厚い図13(a), (c)の場合でも、ごく表層部分において Fe が検出されている。これは、玉に転移膜が形成された後でも M-50 の摩耗粉が生成されていたこと、すなわち、この転移膜は M-50 を摩耗させることを示唆している。

図13の(a)と(b), (c)と(d)を比較すると、界面が露出するエッチング時間が100分から600分程度と大幅に異なっている。同じ軸受内のボールであっても転移膜の形成度合いがかなり異なっていたことがわかる。また、図13(a)では Fe が多量に検出されたのに対し他の玉からはるかに少ない Fe しかなかったこと、図13(c)では O が転移膜内から他の玉に比べてきわめて多量に検出されていることなど、ボール

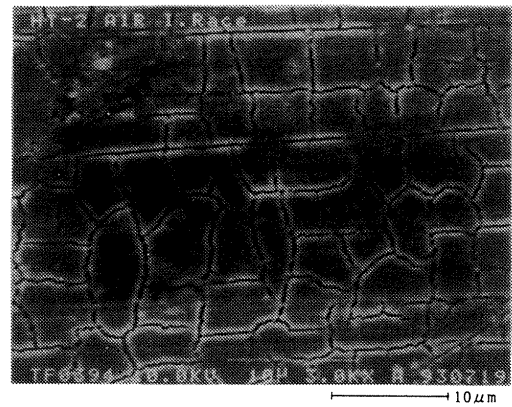


図14 内輪の非しゅう動部表面

毎に転移膜の性質そのものも異なっていたと思われる。どのような状態で Fe や O が存在していたのか、なぜボールによって転移膜の成分が大幅に異なるのかなどについては不明であり、今後の検討が必要である。

図14は、内輪の非しゅう動部の SEM 写真である。スパッタ MoS_2 被膜には多くのクラックが認められる。 MoS_2 と下地 M-50 との熱膨張率の相違により、 MoS_2 被膜に引張応力が働いたためクラックが生じたものと推測される。XPS 分析からボールのスパッタ MoS_2 被膜が摩耗していたと推測されることを述べたが、このようなクラックの存在により、スパッタ MoS_2 被膜の寿命が低下したものと考えられる。

以上の結果は、内外輪・玉のスパッタ MoS_2 膜は運転の比較的初期に摩耗してしまい、その後保持器から MoS_2 を含む複合材成分が、内輪からは摩耗した M-50 が供給され、Fe を含む MoS_2 膜が形成されたことを示している。ごく初期を除けば、この軸受は保持器からの転移膜のみによって潤滑されていたと考えられ、実験で得られた良好な性能はこの転移膜によるものと推定される。以上の実験結果から判断すると、この軸受はさらに長期間の運転が可能であったと推定される。

3.3 総玉形式 Si_3N_4 セラミック軸受

図15は内外輪、玉に MoS_2 をスパッタした総玉形式の Si_3N_4 セラミック軸受を、 500°C において実験した結果である。摩擦トルクは、運転時間350時間頃までは変動がやや大きいものの値は比較的低く、軸受は良好に潤滑された状態であったと思われる。その後、約500時間および600時間でトルク、圧力が急上昇したため、636時間で運転を打ち切った。総回転数は 2.3×10^7 回であった。

図16は、試験後、反射板を取り外した状態の真空槽側軸受部である。大量の摩耗粉が円筒状の反射板上に堆積している。実験後の軸受の検査では、真空槽側軸受には内外輪、玉すべてに異常摩耗がみられた。一方、フランジ側軸受に

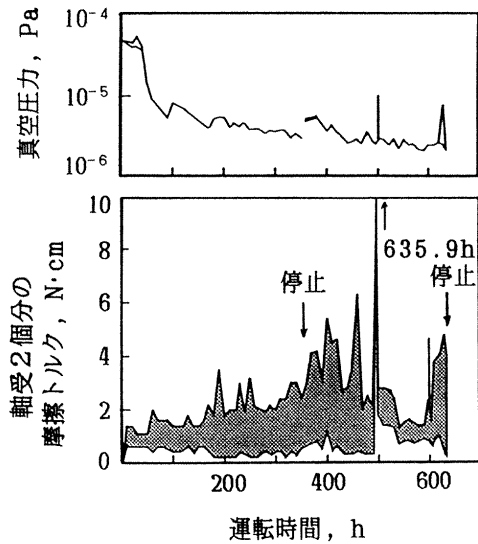


図15 セラミックス総玉軸受の摩擦トルク

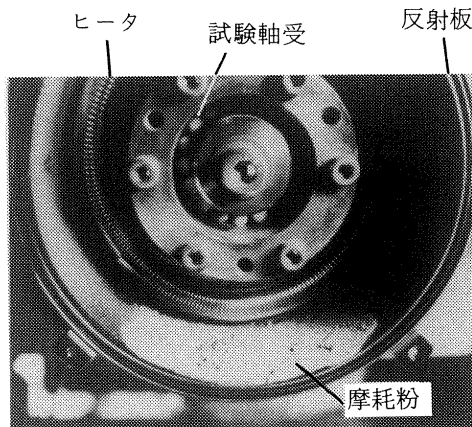


図16 試験後の試験軸受部外観

は異常は認められず、玉には MoS_2 膜も残っていた。トルク上昇はもっぱら真空槽側軸受に起因していたことになる。表 5 に試験後軸受の検査結果を示す。真空槽側軸受の摩耗量は、玉が0.24mm、内輪で0.14mm、外輪で0.05-0.31mmといずれも異常な摩耗が発生していた。一方、フランジ側軸受は精度測定の結果でも異常はみられず、良好な状態であった。真空槽側軸受のみが異常に摩耗した原因は不明だが、玉同士の干渉の程度の差によってここまで異なった特性を示すとは考えにくく、高温下で外輪とハウジングが固着し異常な荷重が加わったり、ミスアライメントが異常に大きくなったことなどが原因であったと思われる。

図17は、試験時間約500時間でトルク、圧力が急上昇した時のアウトガスのマススペクトルで、タイムインターバル10分で取り込み三次元表示したものである。トルクが低い状態で検出されたガス成分の90%以上は He であり、他には H_2 、 H_2O などが検出された。真空排気系がクライオポンプのため He の排気能力が低いと思われる。軸受の回転開始に伴うガス放出や、 MoS_2 に由来するガスはほとんどみられなかった。トルクが上昇した際には、マス

表5 セラミックス総玉軸受の試験後の検査結果

試験軸受 内外輪・玉 取付位置	Si_3N_4 +スパッタリング MoS_2 膜 (総玉軸受形式)	
	フランジ側	真空槽側
真円度		
内輪 μm	0.4	5.5
外輪 μm	0.4	N. M. *
玉 μm	0.5	11.0
軌道溝摩耗		
内輪 μm	2	N. M. *
外輪 μm	0	N. M. *

運転条件：50N、500℃、総回転数 2.3×10^7 回

* N. M. : 摩耗大のため測定不能。

ただし、寸法測定から算出した摩耗量は、
内輪 $141\mu\text{m}$ 、外輪 $50-310\mu\text{m}$ 、玉 $242-252\mu\text{m}$

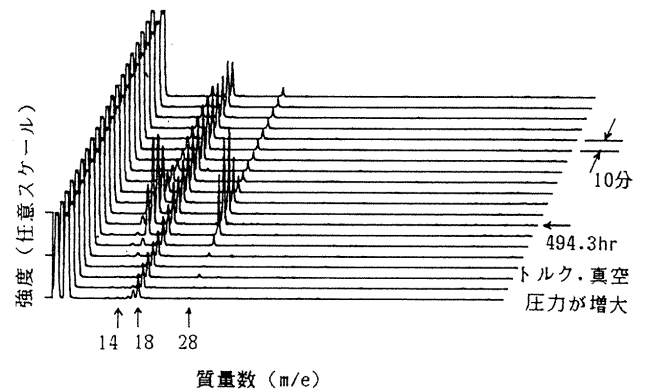


図17 アウトガスのマススペクトル

ペクトルの $m/e=14$ 、28のピークに顕著な増大がみられ、また12(C)、18(H_2O) も大きくなっている。 m/e の値だけからみると、14はN、 CH_2 、28は N_2 、CO、 C_2H_4 、Siに相当する。いずれのガスであったのかはこのデータだけからでは断定できないが、14と28が同時に現われていることから N_2 ガスが主体であった可能性が高い。前述したように軸受には摩耗が大量に発生しており、その際に生じたガスに起因したものと考えられるが、 Si_3N_4 が分解して発生したのか、クライオポンプに吸着されていた N_2 ガスが他のガスの発生により選択的に脱着したものか、そのガス発生のメカニズムは不明である。

以上の結果は、スパッタ MoS_2 で潤滑された総玉形式の Si_3N_4 軸受は、真空中、500℃で少なくとも600時間程度の運転が可能であること、および高温で使用する際には軸受の取付け状態に細心の注意を払う必要があることを示している。さらに、興味深い結果は、異常摩耗が発生するような状況にあっても、 Si_3N_4 軸受が焼付きを生ずることなく比較的低いトルクで回転を持続できたことである。宇宙用軸受では最悪の事態でも焼付かないことが要求されている。

鋼製軸受では、固体潤滑膜が破断すれば焼付きが生じ機器全体の機能が失われる恐れがあるが、 Si_3N_4 軸受の場合には多少性能は落ちてでも回転可能であり、宇宙用軸受としては鋼製軸受より優れた性質を有しているといえる。

3.4 自己潤滑性複合材保持器を用いた Si_3N_4 セラミック軸受

図18は自己潤滑性複合材保持器付き Si_3N_4 セラミック軸受を 500°C で運転した際の摩擦トルクの推移を運転時間に対して示したものである。図18(a)は複合材保持器の組成が $75\% \text{ MoS}_2 + 10\% \text{ MoO}_2 + 10\% \text{ Nb} + 5\% \text{ SUS304}$ の場合、図18(b)は $80\% \text{ MoS}_2 + 10\% \text{ MoO}_2 + 10\% \text{ Nb}$ の場合である。い

づれの保持器材の場合も、1413時間、1450時間の試験終了まで低く安定したトルクを保持した。また、軸受や保持器に起因するアウトガスもみられなかった。このことから保持器に用いた複合材は、真空中で少なくとも 500°C までの温度で使用可能なことが確認された。

図19は、試験後の玉表面の電子顕微鏡写真である。表面の状態は、島状の膜が点在しており、図11に示したハイブリッド軸受の玉表面と極めて類似している。このことは、玉表面の膜が保持器からの転移膜であることを示唆している。内輪軌道面の SEM 写真を図20に示す。ごく薄い滑らかな被膜が形成されているのが観察される。この膜は、軌道面上に存在していた膜をさらに押し拡げて形成されたよ

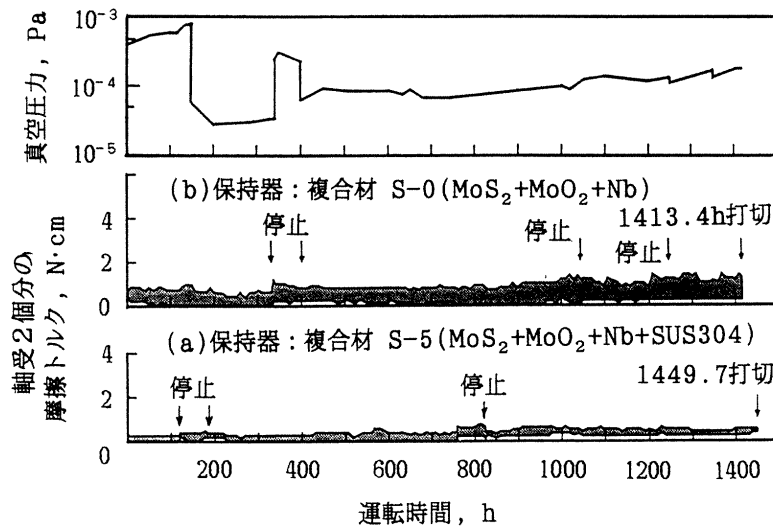


図18 保持器付きセラミックス軸受の摩擦トルク

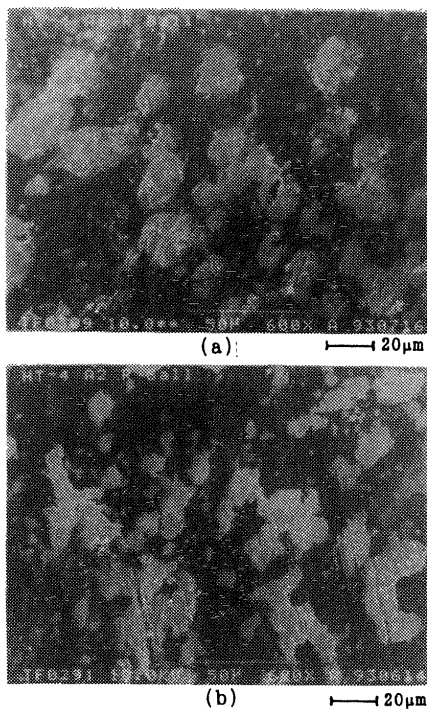


図19 試験後の玉表面の SEM 写真

(a) 保持器材 S-0, (b) 保持器材 S-5

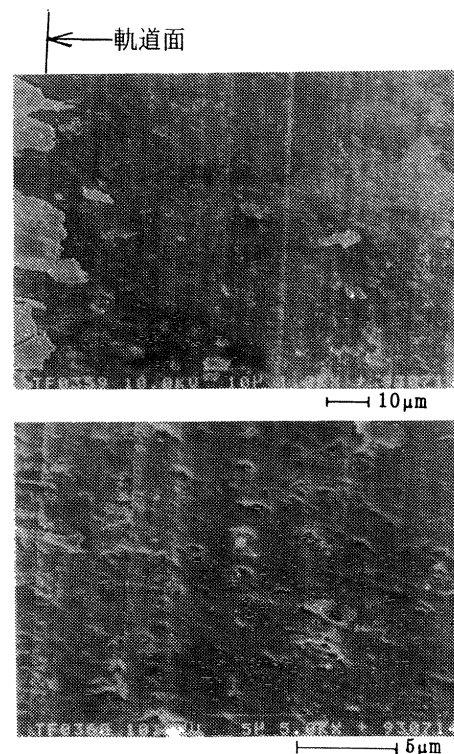
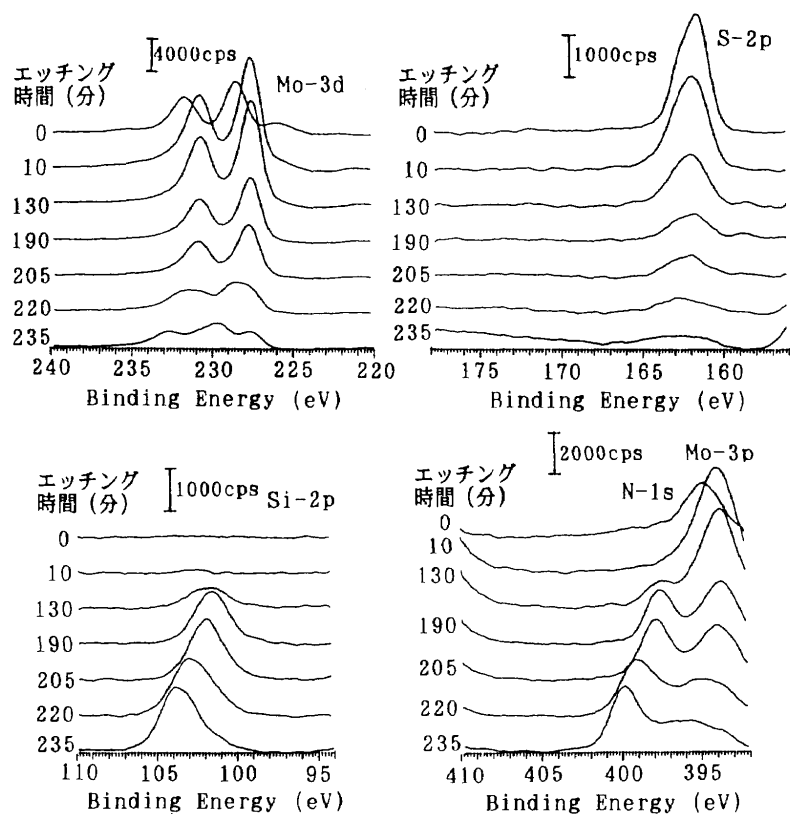
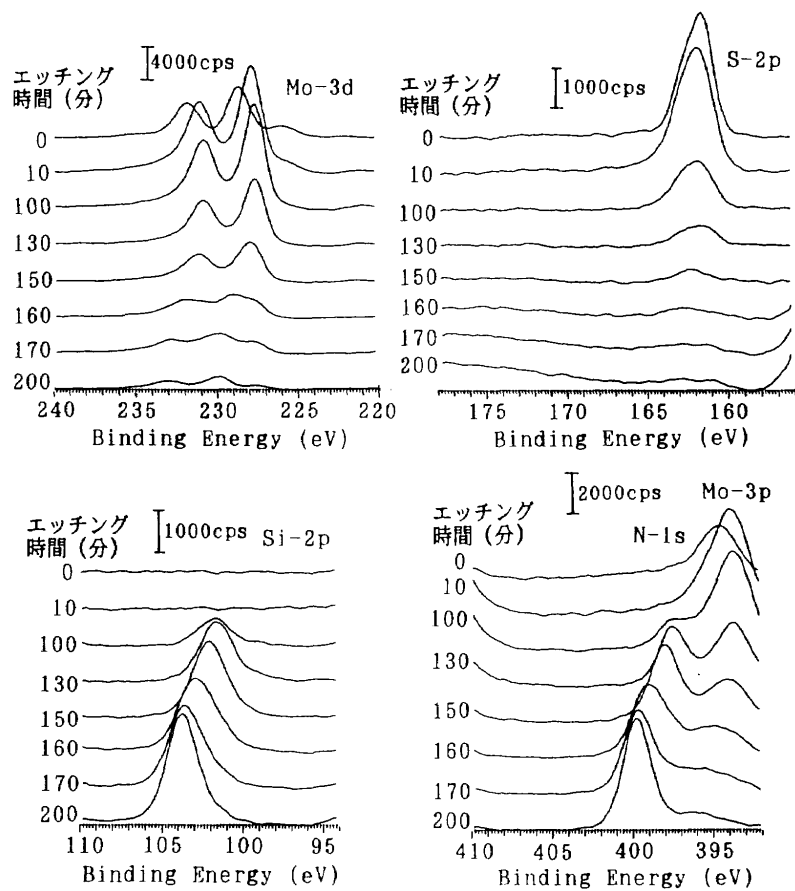


図20 試験後の内輪表面の SEM 写真



(a) 保持器材 S-0



(b) 保持器材 S-5

図21 試験後の玉の XPS スペクトル

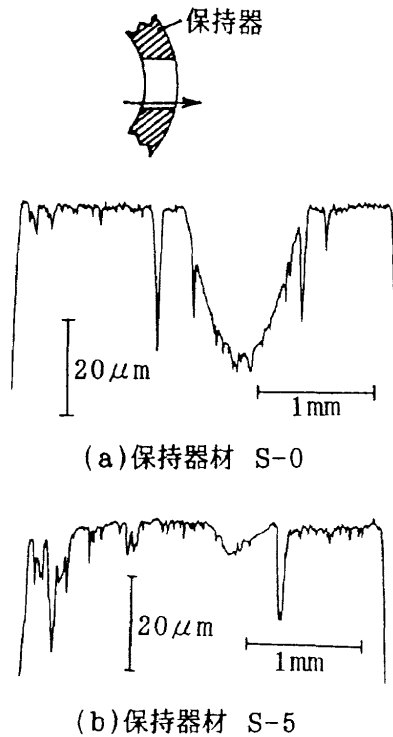


図22 複合材保持器のポケット部の摩耗状況

うに見える。なお、M-50製の内外輪と異なり、非しゅう動面においてMoS₂スパッタ膜にはクラックは認められなかった。

図21は、試験後の玉表面のXPS分析の結果で、Mo-3d, S-2p, Si-2p および N-1s と Mo-3p のスペクトルである。図12のハイブリッド軸受の場合ときわめて類似しており、玉表面の被膜がMoS₂であることがわかる。XPSで深さ方向に分析した際にピークシフトが起きるエッチング時間から、被膜の厚さはハイブリッド軸受に比べるとやや薄い。

図22は、保持器ポケット部の摩耗形状を示したものである。ハイブリッド軸受の場合と同様、SUS304を含む保持器の摩耗はSUS304を含まない複合材より少なく、良好な耐摩耗性を示した。

試験後の軸受の検査結果を表6にまとめた。わずかな回転精度の劣化がみられるものの、軸受はいずれも良好な状態にあることがわかる。ハイブリッド軸受の場合に比べ内外輪の摩耗は1μm程度と少ない。この軸受はさらに長期間の運転が可能であったと推定される。

保持器なしのSi₃N₄軸受は、前節で示したように耐摩耗性が劣っていた。このことは、あらかじめコーティングしたスパッタMoS₂膜が、高温条件下では長期間の運転に耐えられないことを示唆している。一方、自己潤滑性複合材保持器を用いた場合、ハイブリッド軸受の場合と同様、良好な特性が高温で長期間にわたり得られた。高温下での良好な潤滑性能は、保持器からの転移膜により達成されたことを示唆している。

表6 保持器付きセラミックス軸受の試験後の検査結果

試験軸受 内外輪・玉 保持器 取付位置	Si ₃ N ₄ + スパッタリングMoS ₂ 膜			
	複合材保持器 S-5*		複合材保持器 S-0*	
	フランジ側	真空槽側	フランジ側	真空槽側
回転精度				
ラジアル振れ μm	6	5	8	6
アキシャル振れ μm	12	10	30	15
真円度				
内輪 μm	0.8	1.2	1.2	1.2
外輪 μm	1.7	1.2	1.0	1.1
玉 μm	0.16	0.12	0.09	0.14
保持器摩耗				
ポケット μm	1-7	1-7	16-32	6-10
案内面 μm	0	0	0	0

運転条件: 50N, 500°C, 総回転数 5×10^7 回

*1: S-0の組成 80%MoS₂+10%MoO₃+10%Nb

S-5の組成 75%MoS₂+10%MoO₃+10%Nb+5%SUS304

4. ま と め

M-50鋼製軸受、内外輪M-50+玉Si₃N₄のハイブリッド軸受、およびSi₃N₄軸受について、鋼製軸受・ハイブリッド軸受は350°C、Si₃N₄軸受は500°Cにおいて真空中で総回転数 5×10^7 回(約1400時間)までの試験を行なった。その結果、

- (1) ホットプレス法で作成した自己潤滑性複合材保持器を用いたSi₃N₄軸受は、真空中、500°Cの高温下で、試験中安定した低い摩擦トルクを維持し、また試験後の軸受には摩耗が少なく、きわめて良好な性能を示した。
- (2) 自己潤滑性複合材保持器を用いたハイブリッド軸受は、真空中、350°Cできわめて良好な性能を示した。
- (3) 銀厚膜めっきを施した保持器を用いたM-50軸受は、トルクの値と変動がやや大きい、真空中、350°Cで使用可能であった。
- (4) Si₃N₄軸受は固体潤滑膜がない状態でも焼付きには到らず、ややトルクは高くなるものの、回転が可能であった。
- (5) 真空中・高温下ではMoS₂スパッタ膜には長時間の寿命は期待できず、自己潤滑性複合材保持器から形成された転移膜が長期間良好な潤滑の主体と考えられる。

5. 謝 辞

鋼製保持器の銀の厚膜めっきについては大阪ウエルディング工業(株)、試験後の軸受の検査は、(株)NTN、光洋精工(株)にお世話になった。厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Zaretsky, E. V. ; "Liquid lubrication in space", Tribol. Int., Vol.23 (1990) pp.75-93.

- 2) 西村 允, 関 勝美, 宮川行雄 ; “自己潤滑性複合材保持器を用いた固体潤滑ころがり軸受の潤滑特性に関する研究 (第1報) アースセンサ用軸受の選択試験”, 航技研報告 TR-1019 (1989).
- 3) Gass, H., Hintermann, H. E., Stehlé, G., and Briscoe, H. M. ; “Bearings for Extreme Environments”, Proc. 1st Euro. Space Tribol. Symp., ESA SP-111 (1975) pp.281-291.
- 4) Ogawa, T., Konishi, K., Aihara, S., and Sawamoto T. ; “Development of Ball Bearings with Solid Film for High-Vacuum, High-Temperature, High-Speed Application”, Lubr. Engrs., Vol.49 (1993) pp.291-299.
- 5) 宮川行雄, 西村 允, 野坂正隆, 宮脇雄三 ; “イオンプレーティング金, 銀膜の摩擦, 摩耗特性に関する研究”, 航技研報告 TR-505 (1977).
- 6) 西村 允, 野坂正隆, 鈴木峰男, 関 勝美, 宮川行雄 ; “高周波スパッタリング法による二硫化モリブデン膜の潤滑特性に関する研究”, 航技研報告, TR-903 (1986).
- 7) Sliney, H. E. ; “Solid Lubricant Materials for High Temperatures—A Review”, Tribol. Int., Vol.15 (1982) pp.303-315.
- 8) Dellacorte, C., Sliney, H. E., and Bogdanski, M. S. ; “Tribological and Mechanical Comparison of Sintered and Hipped PM212 : High Temperature Self-lubricating Composites”, Lubr. Engrs., Vol.48 (1992) pp.877-885.
- 9) Sliney, H. E. ; “The Use of Silver in Self-lubricating Coatings for Extreme Temperatures”, ASLE Trans., Vol.29 (1986) pp.370-376.
- 10) Boes, D. J. ; “Unique Solid Lubricating Materials for High Temperature-air Applications”, ASLE Trans. Vol.10 (1967) pp.19-27.
- 11) Boes, D. J., and Cunningham, J. S., and Chasman, M. R. ; “The Solid Lubrication of Ball Bearings under High Speed-High Load Condition from -225 to +1000 F”, Lubr. Engrs. Vol.27 (1971) pp.150-159.
- 12) Boes, D. J. ; “Solid Lubricated Bearing Technology”, AFAPL-TR-71-69 Part I (Sept. 1971), Part II (Dec. 1972).
- 13) Dayton, R. D., Sheets, M. A., and Schrand, J. B. ; “Evaluation of Solid Lubricated Ball Bearing Performance”, ASLE Trans. Vol.21 (1978) pp.211-216.
- 14) McConell, B. D., and Mecklenberg, K. R. ; “Solid Lubricant Compacts—an Approach to Long Term Lubrication Performance in Space”, Lubr. Engrs., Vol.33 (1977) pp.544-551.
- 15) Campbell, M. E., and Van Wyk, J. W. ; “Development of Design Criteria for a Dry Film Lubricated Bearing System”, AD-403695 (March 1963), または “Development and Evaluation of Lubricant Composites Materials”, Lubr. Engrs. Vol.20 (Dec. 1964) pp.463-469.
- 16) Mecklenberg, K. R. ; “Establishing a Wear Rate Relationship for a Lubricant Compact Material”, Lubr. Engrs. Vol.28 (1972) pp.317-321.
- 17) Lipp, L. C., Van Wyk, J. W., and Williams, F. J. ; “Development of Solid Lubricant Compact Bearings for the Supersonic Transport”, Lubr. Engrs. Vol. 29 (1973) pp.108-115.
- 18) Tribon Materials Bulletin TR-3, Tribon Bearing Company, Cleveland OH, U.S.A.
- 19) Suzuki, M., Moriyama, M., Nishimura, M., and Hasegawa, M. ; “Friction and Wear of Self-Lubricating Composites at Temperatures to 450°C in Vacuum”, Wear, Vol.162-164 (1993) pp.471-479.
- 20) Heshmat, H. ; “Rolling and sliding characteristics of Powder-lubricated Ceramics at High Temperature and Speed”, Lubr. Engrs., Vol.49 (1993) pp. 791-797.
- 21) Lauer, J., and Dwyer, S. ; “Tribocchemical Lubrication of Ceramics by Carbon from Organic Vapors”, AIAA 90-2045 (1990).
- 22) Graham, E. E., Nesarikar, A., Forster, N., and Givan, G. ; “Vapor Phase Lubrication of High-temperature Bearings”, Lubr. Engrs., Vol.49 (1993) pp.713-718.
- 23) 宮川行雄, 関 勝美 ; “一酸化鉛で潤滑した玉軸受の 650°C における性能”, 航技研資料 TM-336 (1977).
- 24) Sutor, P., and Gardos, M. N. ; “Solid Lubricated Turbine Bearings, Part II, Development of 316 C Composites for a Steel Conterface”, Proc. 3rd Int. Solid Lub. Conf. (1984) pp.258-265.
- 25) Gardos, M. N., and Sutor, P. ; “Solid Lubricated Turbine Bearings, Part III, Development of 316 C Composites for a Ceramic Conterface”, Proc. 3rd Int. Solid Lub. Conf. (1984) pp.266-274.
- 26) Lince, J. R., Carre, D. J., and Fleischauer, P. D. ; “Effects of Argon Ion Bombardment on the Basal Plane Surface of MoS₂”, Langmuir, Vol.2 (1986) pp.805-808.

航空宇宙技術研究所報告1243号

平成6年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422) 47-5911(大代表) ㊦182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田 2-1-18

Printed in Japan